基于 TDTR 方法的碳化硅低温导热性能实验研究

张航[1,†]，王新伟[1,2,3,†]，张中印[4]，陈哲[1,2]，孙方远[1,*]，唐大伟[4,*]

(1.中国科学院工程热物理研究所，北京 100190；2.中国科学院大学，北京 100049；3.中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院，青岛 266580；4.大连理工大学海洋能源利用与节能教育部重点实验室，大连 116024)

(Tel:010-82543164, *Email: dwtang@dlut.edu.cn, sunfangyuan@iet.cn)

摘要：低温条件下碳化硅等半导体材料热导率的实验研究极少，数据匮乏，无法满足理论模型的优化需求。现有实验测量以接触式的稳态法导热系数测量为主，实验误差大，且低温测量成本过高。本文通过常规飞秒激光抽运探测热反射法与低温系统的有机结合，完成了 4K-300K 低温条件下单晶碳化硅热导率的测试及其随温度的变化规律，研究表明单晶碳化硅热导率在 100K 左右存在极大值，温度低于 100K 时其热导率与温度成正相关，温度高于 100K 时其热导率与温度成负相关。极值点的位置与理论值的偏差可能是由于样品电子浓度、缺陷分布等因素影响。

关键词：时域热反射法；低温系统；热导率；碳化硅晶体

An Experimental Study on Thermal Conductivity of Silicon Carbide via the TDTR Method under Low Temperatures

ZHANG Hang[1,†] WANG Xin-Wei[1,2,3,†] ZHANG Zhong-Yin[4] CHEN Zhe[1,2] SUN Fang-Yuan[1,*] TANG Da-Wei[4,*]

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

4. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: There are very limited experimental researches on the thermal conductivity of semiconductors like SiC at low temperatures. Thus, this cannot meet the needs of theoretical model optimization due to the scarce data. The existing experimental measurements are mainly based on the steady state method, which is a contact method with large experimental errors and prohibitive costs. In this paper, via the organic integration of the time-domain thermoreflectance and cryogenic system, we measured the thermal conductivity of a single crystal silicon carbide sample under low temperatures ranging from 4K to 300K. The result shows that the thermal conductivity of SiC possesses a peak value at about 100K. When the temperature is lower than 100K, the thermal conductivity demonstrates a positive correlation with temperature. However, when the temperature is higher than 100K, there is a negative correlation between the thermal conductivity and the temperature. The deviation of the experimental peak value positions of the thermal conductivities from the theoretically predicted value could be resulted by factors such as electron-doping and different distributions of defects.

Key words: time-domain thermoreflectance; cryogenic system; thermal conductivity; silicon carbide crystal

---

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(No. 51606193，No. 51336009)

作者简介： 张航，(1984-)，男，研究员，主要从事热物性表征以及微纳尺度传热方面的研究。*通讯作者：唐大伟，教授，dwtang@dlut.edu.cn；孙方远，助理研究员，sunfangyuan@iet.cn。†同等贡献。

0 引言

碳化硅晶体具有热导率高、热胀系数小、硬度大、耐腐蚀等优良特性，作为最有前途的非金属功能材料之一，广泛应用于高温发动机叶片，高温余热利用换热器制造等领域，同时也是特种工况下低温工程中的理想材料。相应工况下的碳化硅晶体导热性能是其应用的重要参数，很多学者进行了碳化硅在常温、高温条件下的导热性能研究，数据相对丰富，如 P. G. Neudeck 等采用稳态法测试了 300 K-800 K 高温条件下碳化硅晶体热导率的温度依赖性，且采用多种声子散射机理模型理论预测了碳化硅热导率与温度的关系[1]。吴清仁等采用激光闪光法测试了 300 K-1300 K 高温条件下的碳化硅材料的热导率与温度的关系，指出热导率与温度成反比的关系[2]。苏国萍等采用 3ω 法测试了常温条件下各向异性碳化硅材料的导热系数[3]。而碳化硅低温条件下的热物性数据相对匮乏，长期以来由于实验难度和应用领域等原因研究较少。代表成果如 G. A. Slack 进行了氮、氧杂质掺杂对碳化硅晶体热导率的影响机理研究，指出杂质氮主要通过改变应力场影响声子散射，杂质氧通过晶格缺陷影响声子散射[4]。G. A. Slack 进行的纯碳化硅和含不同杂质碳化硅的热导率随温度的变化规律研究[5]，研究指出碳化硅中主要是声子导热，由于各种杂质以及晶粒边界等对碳化硅声子的散射造成碳化硅热导率减小，且温度越低，该效应越明显。以上低温实验均采用稳态的接触法测量，实验工况采取整个实验装置浸泡在液氦/液氮或乙醇+干冰液体中，温度控制、加热功率、各项散热、测温精度等多因素制约实验测量的准确度[6]。而目前低温条件下导热性能实验测量的研究整体较少，主要是超导材料导热系数测量[7-13]，采用的方法均以稳态的接触法为主。

本文通过飞秒激光抽运探测时域热反射法(TDTR)，结合牛津仪器 (Oxford) 的液氮/液氦低温系统进行常压 4 K-300 K 低温条件下的碳化硅导热系数实验测量，该热物性测量系统样品处于高真空状态下，通过非接触的光学热反射法获得有效实验信号，实验工况温度控制精度高，测量过程中影响因数少，相较于传统的接触法测量可明显提高实验测量的准确度。

1 实验装置及原理

低温实验工况的实现和稳定控制是低温条件下热物性实验测量的关键因素之一，常用的液体浸没法无法实现测试温度的连续控制，测试温度工况采样点有限，不能满足密集实验采样的需求，本文采用牛津仪器的微量液氦/液氮制冷和电加热耦合 PID 控制的方法，维持了超高真空样品腔内温度的稳定，控温精度达到 0.1 K，充分保证了实验温度的准确和连续温度工况下的实验测量。同时，考虑到作为战略储备资源，液氦已经受到大规模的限产且价格非常昂贵，世界各国的低温实验研究均受到了冲击。低温 TDTR 技术也为低温热物性测量的成本控制以及普及提供了重要的技术支持。

1.1 实验系统

TDTR + Cryogenic 实验系统主要包括飞秒激光抽运探测热反射系统(TDTR)和低温系统 Cryogenic system 两部分，如图 1 所示。

(1)飞秒激光抽运探测热反射实验系统

TDTR 测量原理：在被测样品表面蒸镀~100 nm 左右的金属膜作为传感层，用一束调制的脉冲激光加热样品表面的传感层产生温升，用另一束探测激光照射被加热的样品表面，在一定的温度范围内，传感层的反射率与温度近似成线性关系，因而探测到的反射光强度随传感层表面温度的变化而变化，该温度的变化量是样品结构和对应材料热物性参数的特征函数。通过热输运模型与实验测量数据的拟合，我们可以获取被测样品的未知热物性参数。

实验系统采用 Maitai BB 钛宝石激光器，波长为 800 nm，脉冲宽度为 100 fs，重复频率为 80 MHz，功率为 1.85 W，经偏振分光器分为抽运光和探测光，抽运光经非线性晶体硼酸铋(BIBO)倍频，约 30%波长为 800 nm 的激光变为 400 nm 波长激光，由长波滤光片将未倍频的 800 nm 光滤除(消除抽运光中 800 nm 波长光对探测信号的影响)，然后经电光调制器(Electro-Optic Modulator)调制为特定波形和频率的激光脉冲加热样品表面传感层。探测光经扩束器，光线直径放大 2~3 倍，再经线性位移平台(行程为 600 mm，两次折返达到抽运光和探测光之间最大延迟时间差为 8 ns)，偏振分光器等并保持与抽运光共线，经 10 倍物镜聚焦在样品传感层上。光电探测器感应反射的探测光，由锁相放大器提取光电探测器探测的加载电光调制特性的有效热反射信号。

(2)低温系统

Cryogenic system 主要包括七部分，低温腔、样品架、输液管(Transfer tube)、杜瓦瓶(Cryogen storage dewar)、气体流量泵(Gas flow pump)、分子泵和控温仪。工作原理为：低温腔和输液管用分子泵抽成真空，真空度可达~10^{-5} Pa，实验过程中真空泵始终处于运转状态，设定温控仪至需要的温度工况，并选择自动控温状态，打开气体流量泵，液氦从杜瓦瓶中经输液管到达低温腔内的热交换器，以达到降温的目的，气化后的氦气经输液管夹层流道和气体流量泵排放，实验中 4 K~77 K 工况采用液氦制冷，77 K 以上温区采用液氮制冷。

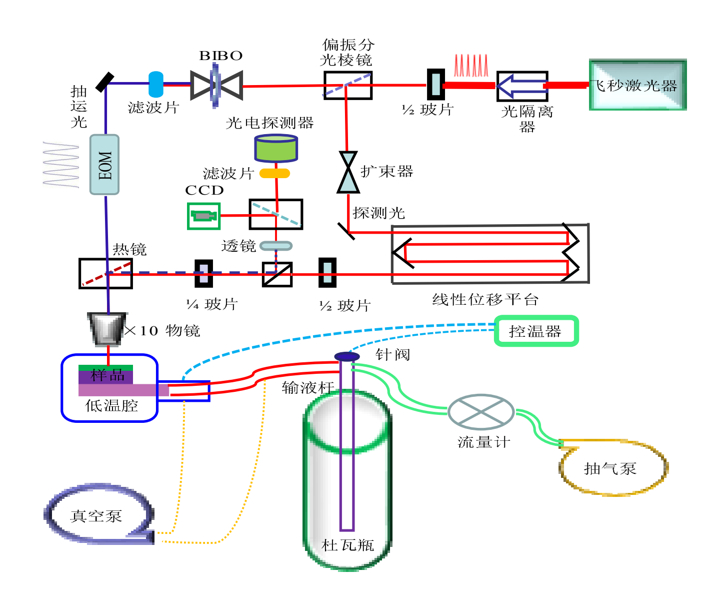


图 1　TDTR+ Cryogenic 实验系统结构示意图

Fig.1　Schematic diagram of TDTR+ Cryogenic experimental system

1.2 样品热输运模型

飞秒激光抽运探测热反射实验系统锁相放大器采集的有效信号为：

$$Z(\omega_0)=\frac{\beta Q_{\text{pump}}Q_{\text{probe}}}{T^2}\sum_{m=-\infty}^{\infty}H(\omega_0+m\omega_s)e^{im\omega_s\tau} \quad (1)$$

其中，β 为传感层的光热反射系数，Q_{pump} 和 Q_{probe} 分别为单个抽运激光脉冲和探测激光脉冲的能量，T 为激光脉冲间隔，ω_0 和 ω_s 分别为调制频率和采样频率，τ 为探测激光相对于抽运激光的延迟时间。$H(\omega)$ 为频域下样品对单位能量脉冲加热的响应：

$$H(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty}k\left(\frac{-D}{C}\right)\exp\left\{\frac{-k^2(R_{pump}^2+R_{probe}^2)}{8}\right\}\mathrm{d}k \quad (2)$$

其中，R_{pump} 和 R_{probe} 分别为抽运激光和探测激光在样品表面的光斑半径，C 和 D 为样品传递矩阵的两个子项，包含样品热物性信息的参数，详细推导见之前的文献报道[14, 15]。在特定测量频率 ω_0 下，假定 C 和 D 已知则可以通过 $H(\omega)$和 $Z(\omega_0)$计算得到与实验测量信号对应的模拟信号，通过拟合 C 和 D 可以最终得到待测量样品的相关热物性参数。

2 实验步骤及细节

2.1 样品制备

飞秒激光抽运探测热反射系统常用于多层薄膜及其界面热阻的测量，本文目的在于测试低温条件下碳化硅材料的热导率。样品制备先将碳化硅表面抛光，后经王水煮沸清洗表面杂质，再用丙酮、乙醇、超纯水超声清洗，晾干后采用电子束蒸镀法蒸镀~100 nm 厚的 Al 膜作为传感层(Al 的热导率较大，热反射率高，光在铝膜中穿透深度较浅，400 nm 和 800 nm 的激光在 Al 膜中的穿透深度分别为 31 nm 和 35 nm，并且 Al 与大多数材料的附着性能好)，结构如图 2。该测试结构为双层膜结构的热输运模型。

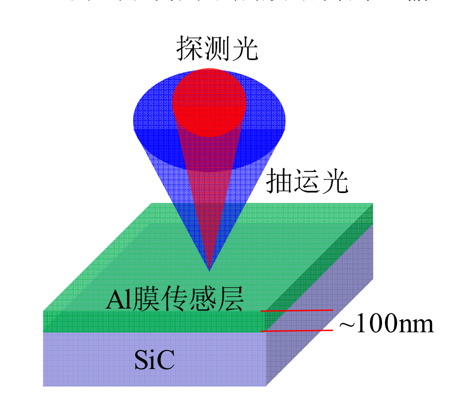


图 2　样品结构示意图

Fig.2　Schematic diagram of the sample structure

2.2 传感层膜厚测量

通过电子束蒸镀法制备传感层，给出的膜厚是经验值，精度较低，而传感层的膜厚是热输运方程的主要参数，其敏感度大，因而需要提高膜厚值的准确性。实验采用 X 射线反射法测量膜厚，结果显示蒸镀 Al 膜厚度为 100.24 nm，误差在±2.5 nm，最大粗糙度不超过 3 nm。另外皮秒声学法是一种快捷、无损、准确地测量不透明薄膜厚度的常用方法，而 TDTR 测试系统采用飞秒激光探测热反射信号，具有皮秒声学法测膜厚的功能，2012 年 Hohensee[16]等利用 TDTR 系统进行了传感层膜厚的测量，本文探索了通过回声测传感层膜厚，结果如图 3 所示，测试采用延迟平台移动速度为 0.3 mm/s，采样频率为 10 点/s，铝中的声速为 6400 m/s，从 TDTR 测试信号图中可以看出两次回声时间间隔为 31.5 ps，得到铝膜厚度为 100.1 nm，与 X 射线发射法测量吻合较好。

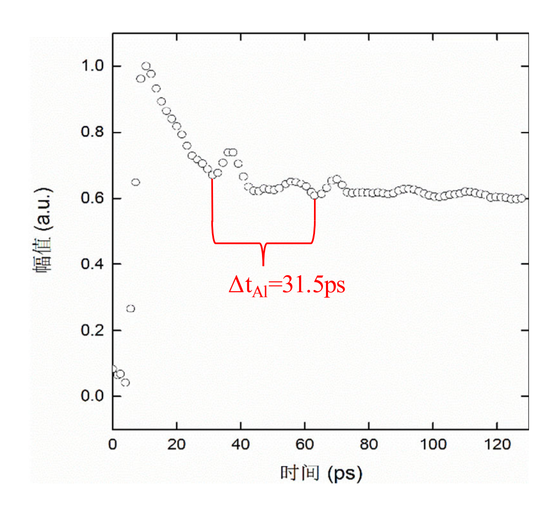


图 3 皮秒声学法测量传感层膜厚度的实验测量曲线。其中第一个波谷对应的横坐标代表热量穿透铝膜到达 Al/SiC 界面的时间，第二个波谷代表热波经 Al/air 界面反射后再次达到 Al/SiC 界面的时间。

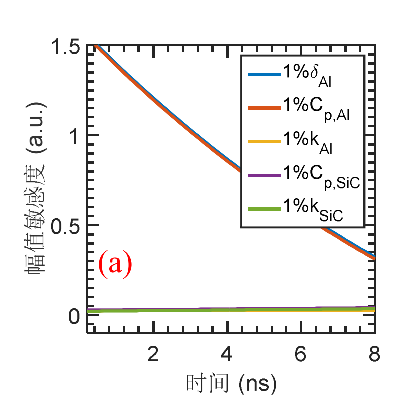
Fig.3 Experimental measurement curve for measuring thickness of the sensing layer by picosecond acoustic method. The horizontal coordinates of the first wave trough represent the time interval that heat penetrates the aluminum film to the Al/SiC interface, and the horizontal coordinates of the second wave trough represent the time interval that heat is reflected by the Al/air interface and reaches the Al/SiC interface again.

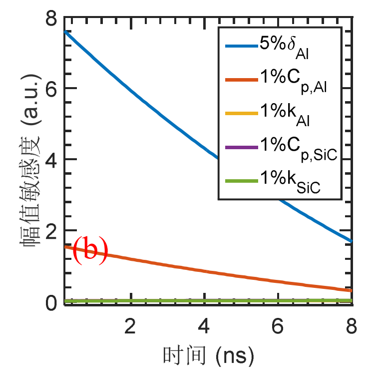
2.3 敏感度分析

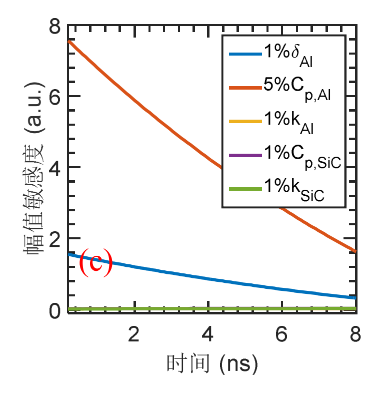
任何一种测量方法敏感度都是一个非常重要的参数，实验数据对待测参数的敏感度越高，测量结果越准确。本实验中用来拟合的锁相放大器采集信号对被测参数敏感度决定了测量结果的准确度。我们采用了 Gundrum[17]等人对敏感度的定义：

$$S_x = \frac{\mathrm{d}\ln(Y)}{\mathrm{d}\ln(x)} \tag{3}$$

其中 x 为待拟合参数，Y 为锁相放大器采集的信号，S_x 为采集信号对该参数 x 的敏感度(S_x 代表幅值信号、相位信号或复数信号)，采用对数形式是为了消除信号强度对信号敏感度产生的影响，本文对幅值信号进行敏感度分析，研究的 Al/SiC 样品热输运模型中包含铝膜的热导率 k_{Al}、碳化硅的热导率 k_{SiC}、碳化硅的比热容 $C_{p,SiC}$、铝膜的比热容 $C_{p,Al}$、铝膜厚度 δ_{Al} 和传感层铝膜与基底碳化硅的界面热导 $G_{Al/SiC}$ 6 个物理参数，其中 $G_{Al/SiC}$ 敏感度在整个延迟时间范围内都很小，本文主要分析其余 5 个参数改变 1%对幅值的敏感度(如图 4(a)所示)，以及每一个参数单独增大 5%对幅值的敏感度(如图 4(b)-4(f)所示)。







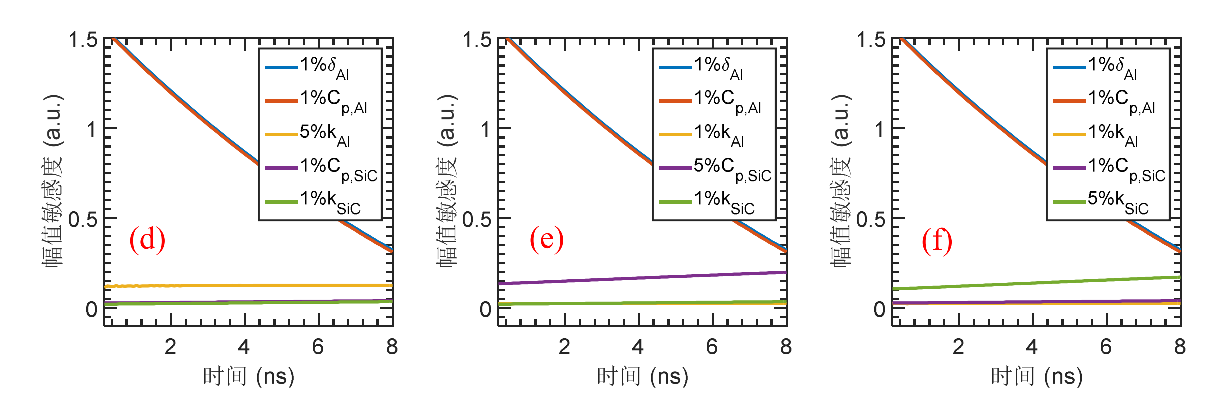


图 4 各参数幅值敏感度分析。(a)五个参数取值都比真值大 1%对幅值信号的敏感度；(b)铝膜厚度比真值增大 5%对幅值信号的敏感度；(c)铝膜比热容比真值增大 5%对幅值信号的敏感度；(d)铝膜热导率比真值增大 5%对幅值信号的敏感度；(e)碳化硅比热容比真值增大 5%对幅值信号的敏感度；(f)碳化硅热导率比真值增大 5%对幅值信号的敏感度。

Fig.4 Sensitivity analysis of amplitude for each parameter. (a) Sensitivity to the amplitude signal by assuming the value 1% greater than the true value for all the five parameters; (b) Sensitivity to the amplitude signal by assuming aluminum film thickness 5% thicker than the true value; (c) Sensitivity to the amplitude signal by assuming the heat capacity of aluminum film 5% higher than the true value; (d) Sensitivity to the amplitude signal by assuming the thermal conductivity of aluminum film 5% higher than the true value; (e) Sensitivity to the amplitude signal by assuming the heat capacity of SiC 5% higher than the true value; (f) Sensitivity to the amplitude signal by assuming the thermal conductivity of SiC 5% higher than the true value.

从图 4(a)中可见，在整个延迟时间内 $C_{p,Al}$、δ_{Al} 对幅值信号的敏感度最大，说明通过 TDTR 实验测试这两个参数是最灵敏的，同时也说明拟合其他未知参数时，这两个参数取值的准确性是被测参数准确度的主要控制因素，在整个延迟时间内 k_{Al}、k_{SiC} 和 $C_{p,SiC}$ 对幅值信号的敏感度相对小很多。通过图 4(a)-图 4(c)的对比可见 $C_{p,Al}$、δ_{Al} 对幅值信号具有相同的敏感度，且随着延迟时间的增加，敏感度减小。通过图 4(d)-图 4(f)的对比可见 k_{Al}、$C_{p,SiC}$ 和 k_{SiC} 对幅值信号的敏感度基本在相同的数量级，约为 $C_{p,Al}$ 和 δ_{Al} 的敏感度的 10%，k_{Al} 的敏感度在整个延迟时间内基本为常数，而 k_{SiC} 和 $C_{p,SiC}$ 的敏感度随延迟时间略呈增大趋势，说明 TDTR 测试系统实验数据拟合处理过程中选取的拟合时间段及相应工况下 k_{Al} 取值的准确性对目标测试值的影响相对最小。

2.4 实验测试

TDTR+Cryogenic 实验系统实物如图 5 所示。被测样品安装在高真空的低温样品腔内，采用常规 TDTR 系统探测光和抽运光通过样品腔光学窗口到达样品表面传感层，本文测试了 4 K~300 K 温度条件下的碳化硅热导率，每个温度工况下测试 3 个点，每个点分别采用调制频率为 1 MHz，3 MHz 和 5 MHz 的抽运光重复测试 3 次，测试结果为多次测量的平均值。TDTR 系统数据处理的本质是通过拟合实验测量数据与理论的热输运方程获得未知的物性参数，其前提是热输运方程中其他相应物性参数需要准确地获得，才能保证测试的未知参数的准确性。然而相应物性参数低温条件下的数据匮乏，其值往往只能采用已有文献值、经验近似值或理论预测值，误差大小难以量化，而其误差又不可避免地传递给目标测试值如碳化硅的热导率，造成实验测试的碳化

硅热导率与温度的关系也存在不确定性。为定性地判定 TDTR 法是否可以满足低温条件下的碳化硅热导率与温度关系的测量分析，本文先通过不同工况下的实验采集信号的对比(如采集的幅值信号变化就是整个样品结构物性参数变化的体现)，避免不同温度条件下热输运方程中相应物性参数取值不确定性对于结果的影响。不同温度下 TDTR 系统采集的幅值信号如图 6 所示。

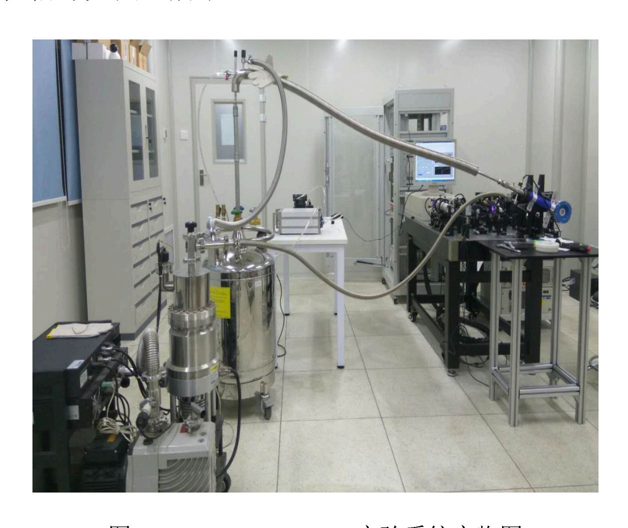


图 5 TDTR+Cryogenic 实验系统实物图

Fig.5 The physical drawing of TDTR+ Cryogenic experimental system

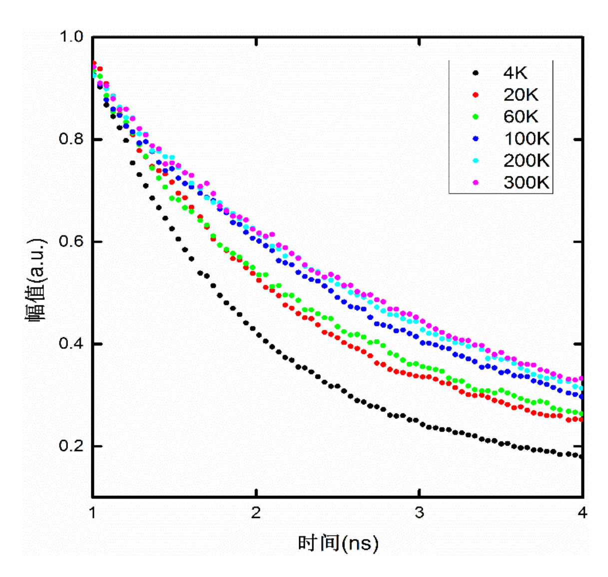


图 6 不同温度下实验系统采集的幅值信号，归一化的幅值信号强度随温度的降低而更快地衰减

Fig. 6 Amplitude signal of the experimental system under different temperature, the normalized amplitude signal intensity decreases more rapidly with the decrease of temperature

从图 6 种可以看出样品表面的热反射信号在不同温度条件下随时间的变化是不同的，说明样品物性参数变化的综合效应在 TDTR 系统中可以体现出来。具体的数值变化由热输运模型与实验测试信号的拟合处理获得。

3 实验结果分析与讨论

测试样品为某企业提供的单晶样品，本文虽未对样品晶体结构进行直接测量，但对样品的基本性质的判断可通过常温条件下的热导率测试获得。拟合幅值信号得样品的热导率为 478.6 W/(m·K)，与 6H 型单晶碳化硅的热导率 490 W/(m·K) 接近，以此判断实验中选择的样品为 6H 型。测试 4 K~300 K 条件下 SiC 材料的热导率随温度的变化规律，结果如图 7 所示。

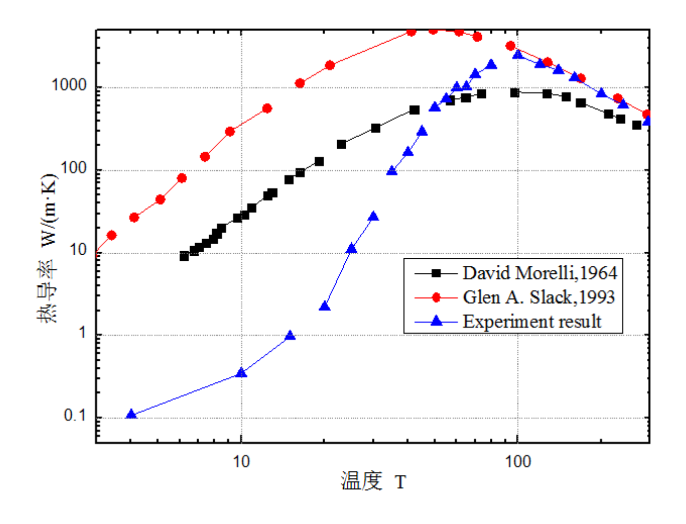


图 7 6H 型 SiC 热导率随温度的变化规律

Fig.7 The variation law of 6H-SiC thermal conductivity with temperature

由图 7 可见本文实验测量的 SiC 热导率随温度的变化规律整体上与 David Morelli[19]和 Glen A. Slack[5] 的研究结果具有相同的变化趋势。这主要是由于高温下，更多模式的声子被激发，载热声子数

量以及携带的能量会得到增加，而低温下被激发的声子数量虽少，但声子平均自由程会增长，因而也具有促进热导率提高因素。这两个机制的相互竞争，加之缺陷、晶粒边界等材料自身结构因素所带来的声子散射，便形成图 7 中所示的变化趋势。虽然实验数据在高温区有较好的一致性，但在低温区的值差异较为明显，其原因可能是来自于以下几个方面：一是样品本身的纯度和结构差异。在低温条件下，材料本征的声子平均自由程虽有增加，但不同样品内部的缺陷及杂质对声子造成了不同程度的散射，这将使得不同研究者的测试结果相差很大[20]。另一个原因是，低温条件下采用 TDTR 测试虽然实验工况温度控制精度高，但是低温下铝膜的热导率、比热容，碳化硅的比热容以及碳化硅与铝膜的界面热导的取值不准确都会给目标测量值带来误差，且温度越低敏感度越大，故实验测量值准确度难以控制。而其他学者采用稳态法等常规接触法测量，温度梯度、散热损失等测量和处理也都有一定的误差，造成不同研究者在低温条件下的测量值相差很大。本工作测试碳化硅的热导率极大值约在~100 K 这与 Glen A. Slack[5]的实验结果~50 K 存在极大值差距较大，与 David Morelli[19]的实验结果~90 K 为极大值相近，但都与理论的预测值~70 K[21]存在一定的偏差，这可能是由于不同样品中电子浓度或其它缺陷的不同造成的[22]。我们注意到 A. J. Minnich 等人的研究成果显示，在低温下由于声子平均自由程的增加，部分声子的平均自由程可能会达到甚至超出探测光斑的直径[23]，从而使热导率的测量值偏小，这有可能会影响到我们的测量结果。但是通过对比该文献[23]中的实验数据，我们发现在低温下，当探测光斑大小由最小的 15 μm 增加到最大的 60 μm 时，相应的热导率变化量仍远小于本工作与 Glen A. Slack 等人所报道的测量结果的差别。故该因素虽然值得进一步的研究和讨论，但是在本问题中应当不是热导率明显偏低的最主要的原因。

4 结论

本工作搭建了非接触法低温条件下的材料热物性表征实验系统(TDTR+Cryogenic)，实现了 4 K~300 K 连续实验温度的精确控制，扩展了原 TDTR 系统的热物性研究范围。通过研究发现本文测试的单晶碳化硅热导率在 100 K 存在极大值，当温度低于 100 K 时其热导率与温度成正相关，而温度高于 100 K 时其热导率与温度成负相关。极低温条件下碳化硅的热导率影响因素复杂，不同的研究者得到了不同的数值。由于低温条件下热导率实验测量的影响因素比较复杂，因此制备理想物理结构的测试样品，采用合适的实验方案和表征手段研究各因素对热导率的影响，以及提高热输运模型中相应物性参数的敏感度和取值准确性，将是我们深入进行低温热物性实验研究的主要目标。

参考文献

[1] Joshi R P, Neudeck P G, Fazi C. Analysis of the temperature dependent thermal conductivity of silicon carbide for high temperature applications[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(1): 265-269.

[2] 吴清仁，文璧璇. SiC 材料导热系数和热膨胀系数与温度关系[J]. 华南理工大学学报：自然科学版, 2008 (3). WU Qingren, WEN Bixuan. The relationship between temperature and thermal conductivity and thermal expansion of SiC. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2008 (3).

[3] 苏国萍，唐大伟，郑兴华，等. 3ω 方法测量各向异性 SiC 晶体的导热系数[J]. 工程热物理学报, 2011. **32**(11): p. 1885-1888.
SU Guoping, TANG Dawei, ZHENG Xinghua, et al. Measurement of thermal conductivity of anisotropic SiC crystals by 3ω method. Journal of Engineering Thermophysics, 2011.32 (11): P. 1885-1888

[4] Slack G A. Nonmetallic crystals with high thermal conductivity[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1973, 34(2): 321-335.

[5] Slack G A. Thermal conductivity of pure and impure silicon, silicon carbide, and diamond[J]. Journal of Applied Physics, 1964, 35(12): 3460-3466.

[6] Slack G A. Thermal Conductivity of CaF, MnF2, CoF2, and ZnF2 Crystals[J]. Physical Review, 1961, 122(6): 1962.

[7] Yakıncı M E, Balcı Y, Aksan M A. Thermoelectric power and thermal conductivity properties in superconducting (MgB 2) 2− x Cr x materials[J]. Physica C: Superconductivity, 2004, 408: 684-685.

[8] Putti M, Braccini V, d'Agliano E G, et al. Thermal conductivity of MgB2 in the superconducting state[J]. Physical Review B, 2003, 67(6): 064505.

[9] Tanatar M A, Nagai S, Mao Z Q, et al. Thermal conductivity of superconducting Sr2RuO4 in oriented magnetic fields[J]. Physical Review B, 2001, 63(6): 064505.

[10] Kurita N, Ronning F, Miclea C F, et al. Low-temperature thermal conductivity of BaFe 2 As 2: A parent compound of iron arsenide superconductors[J]. Physical Review B, 2009, 79(21): 214439.

[11] Bauer E, Paul C, Berger S, et al. Thermal conductivity of superconducting MgB2[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2001, 13(22): L487.

[12] Zhao J, Shen C X, Zhou F, et al. Anomalies in low-temperature thermal conductivity of underdoped La2−xSrxCuO4 single crystals[J]. Superconductor Science and Technology, 2005, 18(7): 966.

[13] Andersson B M, Sundqvist B, Niska J, et al. Thermal conductivity of polycrystalline YBa 2 Cu 4 O 8[J]. Physical Review B, 1994, 49(6): 4189.

[14] Schmidt A J. Optical characterization of thermal transport from the nanoscale to the macroscale[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[15] 孙方远，祝捷，唐大伟. 飞秒激光抽运-探测方法测量液体热导率[J]. 科学通报, 2015(14): p. 1320-1327
SUN Fangyuan, ZHU Jie, TANG Dawei. Measurement of thermal conductivity of liquids by femtosecond laser pumping. Science Bulletin, 2015 (14): P. 1320-1327

[16] Hohensee G T, Hsieh W P, Losego M D, et al. Interpreting picosecond acoustics in the case of low interface stiffness[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(11): 114902.

[17] Gundrum B C, Cahill D G, Averback R S. Thermal conductance of metal-metal interfaces[J]. Physical Review B, 2005, 72(24): 245426.

[18] Lebedev A A, Chelnokov V E. Wide-gap semiconductors for high-power electronics[J]. Semiconductors, 1999, 33(9): 999-1001.

[19] Morelli D, Hermans J, Beetz C, et al. Silicon car-bide and related materials[C]//Institute of Physics Conference Series. Institute of Physics. 1993: 313-316.

[20] English T S, Phinney L M, Hopkins P E, et al. Mean free path effects on the experimentally measured thermal conductivity of single-crystal silicon microbridges[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(9): 091103.

[21] Morelli D T, Heremans J P, Slack G A. Estimation of the isotope effect on the lattice thermal conductivity of group IV and group III-V semiconductors[J]. Physical Review B, 2002, 66(19): 195304.

[22] Morelli D T, Heremans J P, Beetz C P, et al. Phonon‐electron scattering in single crystal silicon carbide[J]. Applied physics letters, 1993, 63(23): 3143-3145.

[23] Morelli D T, Heremans J P, Slack G A. Estimation of the isotope effect on the lattice thermal conductivity of group IV and group III-V semiconductors[J]. Physical Review B, 2002, 66(19): 195304.